亚洲玉米螟雌蛾产卵偏好寄主植物的筛选及对葎草挥发性化学成分的电生理反应

张文璐，王文强，白树雄，张天涛，何康来，王振营*

（中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害生物学国家重点实验室，北京 100193）

摘要：【目的】鉴定亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 雌蛾在寻找产卵寄主时起重要作用的植物挥发性化学物质，以探索亚洲玉米螟和寄主之间的化学通讯机制。【方法】首先利用田间产卵和风洞行为试验，从酸模叶蓼 *Polygonum lapathifolium*、苘麻 *Abutilon theophrasti*、葎草 *Humulus scandens*、玉米 *Zea mays* 和稗草 *Echinochloa crusgalli* 5 种寄主植物中筛选出亚洲玉米螟雌蛾的产卵偏好寄主；并结合顶空吸附采样法，收集该寄主植物挥发性化学物质；再应用全二维气相色谱与飞行时间质谱联用系统（GC×GC-TOFMS）鉴定植物挥发性物质的化学成分及含量；最后利用气相色谱-触角电位联用仪（GC-EAD）测定亚洲玉米螟雌蛾对提取物中化学成分的触角电位反应。【结果】田间产卵试验结果表明，亚洲玉米螟雌蛾在不同寄主植物上的落卵量依次为玉米 > 酸模叶蓼 > 葎草 > 稗草 > 苘麻。风洞行为试验结果表明，亚洲玉米螟雌蛾对葎草的产卵趋性显著高于其他寄主植物。GC×GC-TOFMS 结果表明，葎草的植物挥发性化学物质主要成分有 45 种，其中，萜烯类相对含量高达 86.29%，醛类、酮类和酯类相对含量合计仅占 15.83%。GC-EAD 结果显示，芳樟醇、α-葎草烯、桧烯、月桂烯、2-正戊基呋喃、壬醛、α-法呢烯、反式-罗勒烯和苯甲醛等 9 种挥发性物质能引起亚洲玉米螟雌蛾明显的电生理反应。【结论】亚洲玉米螟雌蛾对不同产卵寄主的选择具有显著差异性，寄主植物的理化因素是造成选择差异性的主要因素，葎草的植物挥发性化学物质对亚洲玉米螟有较强的吸引作用；芳樟醇、α-葎草烯、桧烯、月桂烯、2-正戊基呋喃、壬醛、α-法呢烯、反式-罗勒烯和苯甲醛 9 种挥发性化学物质对亚洲玉米螟产卵寄主的选择有重要作用。

关键词： 亚洲玉米螟；植物挥发性物质；GC-EAD；GC×GC-TOFMS；风洞行为反应

中图分类号： Q968　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 0454-6296(2018)02-0224-08

Screening of host plants preferred for oviposition by female adults of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae) and their electrophysiological responses to volatile components of *Humulus scandens* (Cannabaceae)

ZHANG Wen-Lu, WANG Wen-Qiang, BAI Shu-Xiong, ZHANG Tian-Tao, HE Kang-Lai, WANG Zhen-Ying* (State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract:【Aim】To explore the chemical communication mechanism between the Asian corn borer *Ostrinia furnacalis* and host plants by identifying the components of volatiles from host plants used by female adults of this insect in searching for oviposition sites.【Methods】The oviposition preference of *O. furnacalis* to host plants including *Polygonum lapathifolium*, *Abutilon theophrasti*, *Humulus scandens*, *Zea mays* and *Echinochloa crusgalli* was screened, respectively, in field oviposition test and indoor wind

基金项目：粮食丰产增效科技创新(2016YFD0300704)；现代农业技术体系(CARS-02)

作者简介：张文璐，女，1993 年 1 月生，山东省德州人，硕士研究生，研究方向为农业昆虫与害虫防治，E-mail：wlzhang199301@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail：wangzy61@163.com

收稿日期 Received：2017-10-18；接受日期 Accepted：2017-12-12

tunnel behavioral test. Headspace volatiles of host plants were collected, and the components and contents of physiologically-active volatiles were identified by using two-dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometry (GC × GC-TOFMS). The electroantennogram responses of *O. furnacalis* to the chemical components of the extract were tested by using coupled gas chromatography-electroantennographic detection (GC-EAD).【Results】The field oviposition test results showed that the number of eggs laid by female adults of *O. furnacalis* on different plants ranked as *Z. mays* > *P. lapathifolium* > *H. scandens* > *E. crusgalli* > *A. theophrasti*. In the wind tunnel bioassay, the adults showed an obvious oviposition preference to *H. scandens*. The GC × GC-TOFMS results showed that there were 45 volatile organic compounds from *H. scandens*, and the relative content of terpenoids was as high as 86.29% and that of aldehydes, ketones and esters in total was only 15.83%. Nine plant volatiles, *i.e.*, linalool, α-caryophyllene, benzaldehyde, sabinene, myrcene, 2-pentylfuran, nonanal, α-farnesene, and *trans*-β-ocimene, caused significant GC-EAG reaction in female adults.【Conclusion】There are significant differences in oviposition preference of female adults of *O. furnacalis* to different hosts. The physical and chemical factors of host plants are the main factors affecting the host selection. *O. furnacalis* shows strong preference to the volatiles of *H. scandens*. Nine volatiles from *H. scandens*, including linalool, α-caryophyllene, benzaldehyde, sabinene, myrcene, 2-pentylfuran, nonanal, α-farnesene, and *trans*-β-ocimenemay, play important roles in oviposition host selection for the Asian corn borer.

Key words: *Ostrinia furnacalis*; volatile components; GC-EAD; GC × GC-TOFMS; wind tunnel

对于植食性昆虫而言,植物不仅是昆虫的食物来源,更为其提供生活场所,寄主植物的选择在昆虫进化过程中具有重要作用(Olsson *et al*., 2005)。昆虫在适应环境的过程中对寄主植物形成不同的产卵趋性,其产卵寄主的选择必须有利于后代个体生长发育。昆虫选择合适寄主产卵是其繁衍种群的关键步骤,不同昆虫对其产卵寄主的选择都具有明显差异性,例如,西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 偏好在菜豆、西葫芦上产卵(Nyasani *et al*., 2013),甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 喜欢将卵产于菠菜和烟草上(Goh *et al*., 1991)。昆虫寻找产卵寄主时,寄主植物的化学信息物质发挥重要的信号作用,挥发性化学物质的组成、比例及扩散距离都会影响昆虫对寄主植物的偏好程度(杜家纬, 1988, 2001; 邓建宇, 2004; 郭建, 2004),例如,甘蓝挥发物中的某些非极性化学物质对小菜蛾 *Plutella xylostella* 产卵寄主的选择有较强的刺激和引诱作用(Hughes *et al*., 2010);其次,寄主植物的形态、颜色、大小及表面的粗糙程度等物理性状也会影响昆虫的产卵行为,油松球果小卷蛾 *Gravitarmata margarotana* 倾向于在红色球果上产卵(张贺贺等, 2015)。利用昆虫与寄主植物之间的关系,进而研究寄主植物挥发性化学物质在昆虫产卵行为中的调控作用,为防治害虫探索新的治理途径,并对害虫综合治理具有重要意义。

亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 是我国玉米 *Zea mays* 上的最重要害虫,严重影响玉米产量和质量,大发生年份使玉米减产 30% 以上(周大荣, 1996; 王振营等, 2000)。亚洲玉米螟为多食性害虫,寄主来源广泛,我国已经报道的寄主植物种类达 69 种,除为害玉米、高粱、谷子等粮食作物外,还为害葎草 *Humulus scandens*、酸模叶蓼 *Polygonum lapathifolium*、稗草 *Echinochloa crusgalli*、苘麻 *Abutilon theophrasti*、苍耳 *Xanthium sibiricum* 等多种野生寄主(李文德和王秀珍, 1981),袁志华等通过室内生物测定方法和田间试验初步筛选出 9 科 27 种亚洲玉米螟的寄主植物,其中酸模叶蓼、玉米、苍耳、葎草、谷子、苘麻为亚洲玉米螟较适宜的寄主植物,结果表明亚洲玉米螟对酸模叶蓼、葎草、苘麻等野生寄主植物具有显著偏好(袁志华等, 2013),据此推测偏好性寄主植物的挥发性化学物质对亚洲玉米螟雌蛾产卵寄主的选择具有重要影响。

本研究利用产卵试验和风洞(wind channel)行为试验,测定亚洲玉米螟雌蛾对玉米、葎草、稗草、酸模叶蓼、苘麻 5 种重要寄主植物的风洞行为反应和田间产卵趋性,结果表明亚洲玉米螟雌蛾的偏好寄主为葎草,进而对该寄主植物中能引起亚洲玉米螟雌蛾电生理反应的挥发性化学成分进行定性和定量分析,从化学生态学角度揭示亚洲玉米螟雌蛾寻找

产卵寄主的行为机制，为亚洲玉米螟雌蛾引诱剂的制备及绿色防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

亚洲玉米螟成虫于 2017 年采自吉林省公主岭市，在人工气候箱（饲养温度 27 ±1℃、相对湿度 60% ~80%、光周期 16L: 8D）中以人工饲料（周大荣等，1980）繁殖 2 ~3 代，化蛹后将雌雄分别放入两个羽化笼（长×宽×高 =20 cm×20 cm×20 cm），每天收集羽化的成虫（雌: 雄 =1: 2）放至交配笼中并喂以 10% 蜂蜜水，取 2 –3 日龄已交配雌蛾用于试验。

1.2 供试植物

将蓼科的酸模叶蓼、锦葵科的苘麻、桑科的葎草、禾本科的玉米（品种为先玉 335）和稗草 5 种寄主植物的种子（野生寄主植物种子于 2016 年在吉林省公主岭市采集），种植于吉林省公主岭市中国农业科学院植物保护研究所野外观察站的试验基地田间笼罩（长×宽×高 =6 m×6 m×3 m）内，待供试寄主植物进入开花期、玉米生长至抽雄期时，选取长势健康未受害的完整植株一部分移栽到塑料花盆（直径 25 cm，高 15 cm）中用于风洞试验；另一部分植株用于产卵试验。

1.3 田间产卵试验

酸模叶蓼、苘麻、葎草、玉米和稗草 5 种植物种植于田间笼罩（长×宽×高 =6 m×6 m×3 m）内，笼罩之间间隔 1 m，待植物长至开花期，每笼罩内接入 60 对（雌: 雄 =1: 1）羽化 2 d 的亚洲玉米螟成虫，接虫第 4 天检查记录亚洲玉米螟产在不同寄主植物上的卵块数和卵粒数（调查 1 次），每处理重复 3 次。

1.4 风洞行为测试

风洞外壁由透明玻璃构成，风洞长 2.2 m，宽和高各 0.85 m。室内温度 26 ±1℃，避免光照，相对湿度 60% ~80%，风源采用标准型净化工作台为供风装置，风速 0.3 m/s，受试昆虫选用已交配、触角和翅完整并进入暗期 3 h 的亚洲玉米螟雌蛾，试验前将雌蛾移入风洞环境适应 1 h。本试验在红色光源下进行，待测植物置于风洞上风端，于风洞下风端 25 cm 处放 40 cm 高的释放台，将盛放雌蛾的容器置于台上。每个处理 5 次重复，50 头雌蛾，每次重复测试 10 头雌蛾，观察时间 1 h，记录雌蛾反应数量，试验中风洞选用假植物作为对照组，排除植物对昆虫的视觉影响。

判断雌蛾对刺激物反应的行为标准如下：（1）兴奋：雌蛾触角竖起、摆动，振翅，前足不断地梳理触角，爬行；（2）起飞：沿气流作“Z”字形飞行；（3）定向飞行：沿植物气流作“Z”字形逆风定向飞行；（4）飞行距离达风洞长度的 1/2 以上：沿植物气流方向逆风定向飞行距离大于等于风洞长度的 1/2；（5）距寄主植物 10 cm 范围内：雌蛾距离植物源小于或等于 10 cm；（6）抵达寄主植物：雌蛾接近寄主植物并降落于寄主植物表面（杜家纬，1988；刘玉秀和孟宪佐，2002；向玉勇等，2009）。

1.5 葎草挥发性物质的提取

根据风洞行为试验中的试验结果，待葎草生长至开花期前期，应用 Pye Volatile Collection Kit（B. J. PYE，Kings Walden，Hertfordshire，UK）装置对葎草的挥发性物质进行提取。用聚乙烯保鲜袋（40 cm×60 cm）套住植株的地上部位，装置进气端插入袋顶端左侧开口，深入植物茎部；装置出气端插入袋顶端右侧开口，连接处均用胶带扎紧，进气端空气经活性炭过滤后进入保鲜袋，吸附管内装入 150 mg 吸附剂 Tenax TA（Type Q 60/80Mesh，USA），且与出气管相连，带有植物挥发性物质的空气经吸附管被吸附剂吸附，气体送气流量与出气流量分别为 1.1 和 1.0 L/min，抽气时间持续 24 h，试验重复 6 次。提取的植物挥发性物质用含有稀释 10 万倍葵酸乙酯为内标的色谱纯正己烷（200 μL）洗脱，将洗脱液储存于 1.5 mL 样品瓶中并置于 –20℃ 条件备用。

1.6 葎草挥发性物质分析与鉴定

应用全二维气相色谱与飞行时间质谱联用系统（Agilent 6890，LECO，USA）分析挥发物质组分及含量。Agilent 6890 气相色谱仪（Agilent Technologies，Wil-mington，DE）为 FID 氢火焰例子检测器，载气是氦气（纯度 99.9995%），柱系统由两种色谱柱组成，一种柱为非极性的 Rxi ® -5 Si/MS W/Integra-Guard ®（Crossbond ®，Selectivity close to 5% diphenyl/95% dimethyl polysiloxan）30 meter ×0.25 mmlD×0.25 μmdf（Cat #13623 –127，Serial #1166618，USA），另一种为中等极性柱 Rtx ® -200（Crossbond ® trifluoropropylmethyl polysiloxane）1.2 m×0.18 mmlD×0.2 μmdf（Cat #45001，Serial #1153873，USA）；进样体积 1 μL，分流比 30: 1。升温程序为：50℃ 恒温保持 1 min，然后以 5℃/min 的速率升至 250℃ 保持 1 min，最后以 5℃/min 速率升

至 280℃ 保持 2 min。质谱检测器 Leco Pegasus III 飞行时间质谱仪(LECO, USA)其电子轰击电离源的电压为 70 eV,离子源温度 200℃ ,采集质量数范围为 33 ~450 amu,采集频率为 50 spectrum/s。

1.7 触角电位反应试验

将 2 – 3 日龄已交配亚洲玉米螟雌蛾触角用解剖刀沿基部剪下,尖端切去 0.5 mm,用导电硅胶将触角与 EAG 的两个银电极(PRG-2, Syntech, Kirchzartrn, Germany)联结,然后将电极插入 EAG 探头中,并与整个 EAG 系统连通。

取 3 μL 植物挥发物样品进样至气相色谱仪(Agilent 6890N-5973N, Agilent Technologies, Palo Alto, CA , USA)。色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱(30 m × 0. 25 mm × 0. 25 μm, J&W Scientice, Folsom, CA),样品在出口端接分流器(OSS-2, SGE, Australia)1∶2分流,分流化合物一部分导入 FID 氢火焰离子检测器,另一部分导入 EAD 检测器。气相色谱检测器为 FID 氢火焰离子检测器,升温程序为:柱箱恒温 50℃,保持 2 min,然后以 5℃/min 的升温速率升至 280℃,保持 2 min,再以 10℃/min 升温至 320℃,保持 10 min。进样口温度为 220℃,检测器温度 280℃。用 GC-EAD 软件(Syntech, The Netherlands)记录气相色谱和触角电位图。GC-EAD 系统分析,触角电位信号经放大器(UN-06, Syntech)放大输出到 IDAC 转换器(Auto Spike, IDAC2/3, Syntech),通过 GC-EAD 软件(Syntech, The Netherlands)采集分析数据,GC-EAD 实验重复 6 次。

1.8 数据分析

采用 SPSS17.0 软件 χ^2 检验分析风洞行为试验数据不同处理间差异显著性;通过方差分析并进行 Duncan 氏多重比较分析产卵试验数据间差异。

2 结果

2.1 雌蛾在不同寄主植物间的产卵选择性的比较

亚洲玉米螟雌蛾在 5 种供试寄主植物上产卵量有显著性差异(表 1)。在不同寄主植物上落卵量依次为玉米 > 酸模叶蓼 > 葎草 > 稗草 > 苘麻。在玉米上卵块数最多,为 27 块/笼,玉米与酸模叶蓼间卵块数差异不显著,而高于其他 3 种寄主,葎草、稗草和苘麻 3 种寄主植物间卵块数差异不显著;在玉米上卵粒数最多,为 957 粒/笼,显著高于其他寄主,酸模叶蓼和葎草上显著高于稗草和苘麻上。

表 1 亚洲玉米螟雌蛾在不同寄主植物产卵量比较

Table 1 Oviposition of female adults of *Ostrinia furnacalis* on different host plants

寄主植物 Host plants	卵块数 Number of egg masses	卵粒数 Number of eggs
玉米 *Zea mays*	27.67 ± 4.67 a	957.67 ± 75.18 a
酸模叶蓼 *Polygonum lapathifolium*	22.00 ± 2.31 a	421.33 ± 45.18 b
葎草 *Humulus scandens*	11.67 ± 0.33 b	348.00 ± 11.79 b
稗草 *Echinochloa crusgalli*	6.67 ± 0.88 bc	167.67 ± 16.90 c
苘麻 *Abutilon theophrasti*	3.67 ± 0.67 c	77.67 ± 17.94 c

表中数据为平均数 ± 标准误;同一列中有不同小写字母的数值间差异显著($P < 0.05$, Duncan 氏多重比较检验)。Data in the table are means ± *SE*, and those followed by different lowercase letters in the same column are significantly different ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test).

2.2 亚洲玉米螟雌蛾对不同寄主植物的风洞行为反应

风洞行为反应试验结果表明(表 2),5 种供试寄主植物皆能引起亚洲玉米螟雌蛾的兴奋与定向飞行,除苘麻外,葎草、酸模叶蓼、稗草及玉米均能引诱

表 2 亚洲玉米螟雌蛾对不同寄主植物的风洞行为反应

Table 2 Behavioral responses of female adults of *Ostrinia furnacalis* to host plants in wind tunnel

寄主植物 Host plants	产生行为反应的虫数 Number of insect individuals with behavioral responses				
	兴奋 Wing fanning	定向飞行 Upwind flight	1/2 以上 Over half way	达 10 cm 内 Approaching within 10 cm to the source	抵达寄主 Landing on the host source
葎草 *Humulus scandens*	7.40 ± 0.68 a	6.60 ± 0.81 a	3.80 ± 1.24 a	3.20 ± 0.97 a	3.00 ± 0.89 a
酸模叶蓼 *Polygonum lapathifolium*	6.20 ± 0.66 b	5.40 ± 1.20 b	3.00 ± 0.94 b	2.20 ± 0.97 b	1.00 ± 0.32 b
稗草 *Echinochloa crusgalli*	5.60 ± 1.03 b	4.60 ± 0.73 bc	2.40 ± 0.92 bc	1.80 ± 0.37 bc	1.20 ± 0.49 b
玉米 *Zea mays*	4.00 ± 0.32 c	3.60 ± 0.60 c	1.50 ± 0.43 c	0.83 ± 0.31 c	0.83 ± 0.31 bc
苘麻 *Abutilon theophrasti*	3.60 ± 0.60 d	3.60 ± 0.66 d	0.60 ± 0.24 d	0.60 ± 0.40 d	0.00 ± 0.00 c
假植物 Fake plant (CK)	3.33 ± 0.76 e	2.67 ± 0.71 e	0.33 ± 0.21 d	0.00 ± 0.00 d	0.00 ± 0.00 c

表中数据为平均值 ± 标准误,同一列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$, χ^2 检验)。Data in the table are mean ± *SE*, and those followed by different lowercase letters in the same column are significantly different ($P < 0.05$, χ^2 test).

雌蛾降落,雌蛾对葎草趋性显著高于其他寄主($P<0.05$);雌蛾对酸模叶蓼与稗草的趋性差异不显著($P>0.05$),两者趋性均显著高于玉米与苘麻($P<0.05$);雌蛾对玉米的趋性显著高于苘麻($P<0.05$)。表明葎草的挥发性化学物质对亚洲玉米螟雌蛾具有显著吸引效果。

2.3 葎草挥发性化学物质的成分分析

通过检索 NIST/EPA/NIH Version 2.0 谱图库,结合保留时间,分析鉴定葎草挥发性化学物质及相对含量。结果如表 3 所示,葎草的挥发物中主要含

表 3 葎草挥发性化学物质组成 GC×GC-TOFMS 鉴定

Table 3 Chemical components of the volatiles from *Humulus scandens* based on GC×GC-TOFMS

编号 No.	化合物 Chemicals	分子式 Molecular formula	保留时间(min) Retention time	相对含量(%) Relative content
1	环庚三烯 1,3,5-Cycloheptatriene	C_7H_8	6.35	1.65
2	2-甲基丁酸甲酯 Methyl 2-methylbutyrate	$C_6H_{12}O_2$	6.44	0.14
3	庚酮 3-Heptanone	$C_7H_{14}O$	8.65	0.60
4	苯乙烯 Styrene	C_8H_8	8.87	0.80
5	庚醛 Heptanal	$C_7H_{14}O$	9.03	0.29
6	α-蒎烯 α-Pinene	$C_{10}H_{16}$	9.94	3.64
7	苯甲醛 Benzaldehyde	C_7H_6O	10.58	2.16
8	桧烯 Sabinene	$C_{10}H_{16}$	10.89	0.49
9	β-蒎烯 β-Pinene	$C_{10}H_{16}$	11.06	8.51
10	2-壬酮 2-Nonanone	$C_9H_{18}O$	11.20	0.39
11	月桂烯 Myrcene	$C_{10}H_{16}$	11.23	31.63
12	2-正戊基呋喃 2-Pentylfuran	$C_9H_{14}O$	11.25	2.16
13	1-十一烷醇 1-Undecanol	$C_{11}H_{24}O$	11.28	0.39
14	丁酸丁酯 Butanoic acid, butyl ester	$C_8H_{16}O_2$	11.33	0.75
15	正辛醛 Octanal	$C_8H_{16}O$	11.56	0.62
16	1,4-己二烯 1,4-Hexadiene	C_6H_{10}	11.57	14.95
17	乙酸己酯 Acetic acid, hexyl ester	$C_8H_{16}O_2$	11.74	0.26
18	松油烯 Terpinene	$C_{10}H_{16}$	12.01	0.43
19	双戊烯 Dipentene	$C_{10}H_{16}$	12.33	33.87
20	反式罗勒烯 *cis*-Ocimene	$C_{10}H_{16}$	12.41	0.35
21	松油烯 Terpinene	$C_{10}H_{16}$	13.07	1.07
22	苯乙酮 1-Phenylethanone	C_8H_8O	13.23	1.68
23	芳樟醇 Linalool	$C_{10}H_{18}O$	14.06	0.24
24	壬醛 Nonanal	$C_9H_{18}O$	14.17	2.88
25	奥甘菊环 Azulene	$C_{10}H_8$	16.41	11.28
26	甲基-2-羟基苯甲酸酯 Benzoic acid, 2-hydroxy-, methyl ester	$C_8H_8O_3$	16.53	0.44
27	癸醛 Decanal	$C_{10}H_{20}O$	16.79	0.83
28	苯并噻唑 Benzothiazole	C_7H_5NS	17.41	1.17
29	1,1-二甲基肼 1,1-Dimethyl hydrazine	$C_2H_8N_2$	20.68	0.23
30	1-壬炔 1-Nonyne	C_9H_{16}	21.48	0.33
31	(+)-香橙烯 Aromadendrene	$C_{15}H_{24}$	22.22	0.76
32	反式石竹烯 *trans*-Caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	22.43	3.68
33	薄荷烷 *Z-p*-Menthane	$C_{10}H_{20}$	22.56	0.33
34	α-法呢烯 α-Farnesene	$C_{15}H_{24}$	23.03	0.35
35	α-葎草烯 α-Caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	23.28	1.51
36	植烷 2,6,10,14-Tetramethyl-hexadecane	$C_{20}H_{42}$	23.68	0.34
37	2-异丙苯基萘 1-Isopropenylnaphthalene	$C_{13}H_{12}$	23.88	0.18
38	法呢醇 Farnesol	$C_{15}H_{26}O$	24.40	2.57
39	1-二十醇 1-Eicosanol	$C_{20}H_{42}O$	24.56	0.22
40	二苯并呋喃 Dibenzofuran	$C_{12}H_8O$	24.68	0.55
41	芴 Fluorene	$C_{13}H_{10}$	26.23	0.18
42	二苯甲酮 Diphenylmethanone	$C_{13}H_{10}O$	27.19	1.80
43	植烷 2,6,10,14-Tetramethyl-hexadecane	$C_{20}H_{42}$	27.79	0.63
44	姥鲛烷 2,6,10,14-Tetramethyl-pentadecane	$C_{19}H_{40}$	28.85	0.82
45	月桂酸甲酯 Dodecanoic acid, methyl ester	$C_{13}H_{26}O_2$	33.52	0.26

有 45 种化合物成分，其中含有 8 种萜烯类化合物相对含量 86.29%，10 种烃类化合物相对含量约为 31.50%，4 种醇类化合物相对含量 3.42%，4 种酮类化合物相对含量 7.19%，4 种醛类化合物相对含量 6.79%，4 种酯类化合物相对含量 1.85%，醛类、酮类和酯类相对含量合计仅占 15.83%；主要成分是萜烯类化合物，烃类化合物次之；萜烯类化合物中双戊烯相对含量高达 33.87%，月桂烯含量仅次于双戊烯占 31.63%；葎草挥发物样品分析保留时间 30 min，出现少许杂质。

2.4　亚洲玉米螟雌蛾对 9 种葎草挥发性物质的触角电位反应

亚洲玉米螟雌蛾对葎草植物挥发性物质的 GC-EAD 结果显示，芳樟醇（linalool）、α-葎草烯（α-caryophyllene）、苯甲醛（benzaldehyde）、桧烯（sabinene）、月桂烯（myrcene）、2-正戊基呋喃（2-pentylfuran）、壬醛（nonanal）、α-法呢烯（α-farnesene）和反式-罗勒烯（*trans*-β-ocimene）9 种化合物均能明显引起亚洲玉米螟雌蛾产生电生理反应（图 1）。

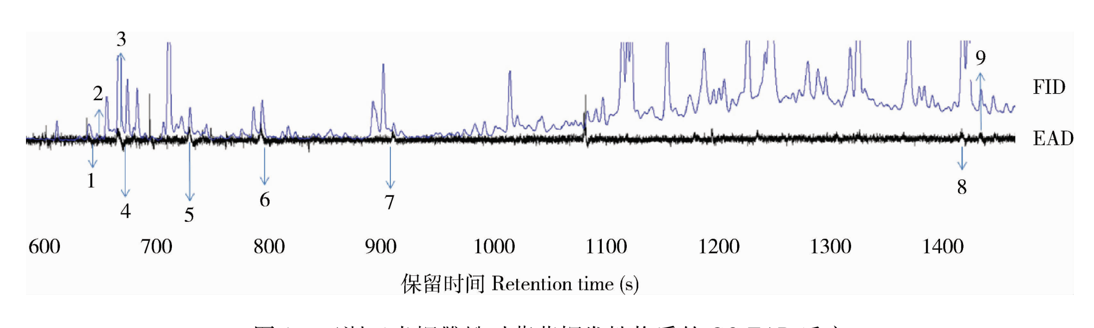


图 1　亚洲玉米螟雌蛾对葎草挥发性物质的 GC-EAD 反应

Fig. 1　GC-EAD responses of female adults of *Ostrinia furnacalis* to volatiles from *Humulus scandens*

苯甲醛 Benzaldehyde；2：桧烯 Sabinene；3：2-正戊基呋喃 2-Pentylfuran；4：月桂烯 Myrcene；5：反式罗勒烯 *cis*-Ocimene；6：壬醛 Nonanal；7：芳樟醇 Linalool；8：α-法呢烯 α-Farnesene；9：α-葎草烯 α-Caryophyllene.

3　讨论

本实验通过田间产卵试验与室内风洞试验相结合，对亚洲玉米螟产卵偏好寄主植物进行了初步研究。田间产卵试验结果显示，亚洲玉米螟在玉米上的落卵量显著高于其他寄主，原因是昆虫在寻找寄主场所时，植物挥发性化学物质、寄主营养物质和选择压力都可能影响昆虫对寄主植物的定向选择（Thompson，2011），昆虫找到寄主场所后，植物的形态特征、表面的粗糙程度及幼嫩程度等物理信号对昆虫选择拒绝或接受寄主植物有重要影响，例如菊蒿叶背面的蜡质表层更能刺激叶甲科昆虫的产卵行为（Müller and Hilker，2001），黑森瘿蚊 *Mayetiola destructor* 雌虫虽然对叶片模型和小麦挥发物都会产生反应，但是更喜欢将卵产于具有小麦挥发物且表面粗糙的物体表面（Kanno and Harris，2010）。亚洲玉米螟具有趋高趋绿的习性（李文德等，2001），喜欢将卵产于外表光滑的植株叶背面近叶脉处（王振营等，2000），该实验中，玉米是 5 种供试植物中长势最旺、叶片面积大而浓绿、叶背面光滑、株高最高的植物，其表面特征更符合亚洲玉米螟产卵喜好，因此，亚洲玉米螟在玉米上落卵量较大；而葎草、酸模叶蓼、稗草和苘麻因植株本身叶表面粗糙，叶面积较小，株高较低等不利因素减弱了亚洲玉米螟的产卵趋性，因此，亚洲玉米螟在此类寄主植物上落卵量较少。

昆虫对寄主植物的选择是两者长期互作、协同进化的结果，同时受多种因素的影响，其中植物挥发性化学物质在昆虫寄主识别中起重要作用，风洞行为反应测定发现，亚洲玉米螟雌蛾对葎草、酸模叶蓼、玉米、稗草和苘麻这 5 种寄主植物均有趋性作用，且对葎草趋性最强。此研究结果说明，亚洲玉米螟对产卵寄主的选择不仅与物理信号有关，而且与寄主植物的挥发性化学物质也有较大关系。风洞环境下，植食性昆虫在寻找寄主过程中，主要依靠嗅觉和视觉信号发现寄主，寄主植物的化学信号在昆虫寻找产卵寄主过程中起主导作用，而这些化学信号中，植物挥发性化学物质最为重要（Zheng *et al.*，2011）。亚洲玉米螟雌蛾在寻找寄主时严格按照植物的化学指纹图谱进行，由于 5 种寄主植物中挥发物组分不同，使得风洞环境下，不同植物对亚洲玉米螟雌蛾有不同的引诱效果，而葎草较强的引诱效果也说明了葎草挥发性化学物质的成分及含量对亚洲

玉米螟雌蛾产卵寄主选择具有重要意义。

葎草挥发性化学物质主要由 45 种成分组成,以萜烯类最多,而萜烯类化合物是植物挥发性化学物质中最多的一类,也是对植食性昆虫诱性强度最大的一类(杜永均和严福顺, 1994; 谷文祥等, 1998; 黎华寿等, 2005)。通过 GC-EAD 初步筛选出对亚洲玉米螟雌蛾具备电生理活性的化合物包括芳樟醇、α-葎草烯、苯甲醛、桧烯、月桂烯、2-正戊基呋喃、壬醛、α-法呢烯和反式-罗勒烯等共 9 种;研究发现特定浓度下的壬醛对亚洲玉米螟雌蛾产卵过程有驱避作用(Huang *et al*., 2009);玉米气味挥发物苯甲醛可显著抑制亚洲玉米螟产卵行为(何康来等, 2000)。植物挥发性化学物质的浓度对昆虫行为调控有重要作用,较高浓度的柠檬烯对欧洲新松叶峰 *Neodiprion sertifer* 具有驱避作用,低浓度时则具有引诱作用(Jung *et al*., 2006)。因此,对亚洲玉米螟雌蛾有生理活性的 9 种化合物在不同浓度范围内对亚洲玉米螟雌蛾会产生引诱作用还是驱避作用,不同作用活性是否与化合物的剂量相关还需要进一步通过标准样品进行验证。其次,植物因自身化学物质成分及浓度的不同,会以一定的比例形成该植物特定化学指纹图谱吸引昆虫,不同化合物混配对引诱昆虫具有协同增效作用,例如:欧洲玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 雌蛾对于壬醛与葵醛比例为 1∶2.4 的混合物有一定的趋性(Molnár *et al*., 2015);将苯甲醛、乙酸顺式-3-己烯酯和顺-3-己烯醇 3 种化合物混合对梨小食心虫 *Grapholitha molesta* 雌虫有更强的吸引作用(Dorn *et al*., 2003)。因此,对于上述对亚洲玉米螟雌蛾有生理活性的 9 种化学成分是单独刺激雌蛾产生趋避性,还是多种成分按一定比例组合行成特异性混合物引诱雌蛾,还需要通过风洞行为试验及田间诱捕试验深入研究。另外,室内风洞技术虽然能模拟生态环境,但真实自然条件下,复杂的田间状态以及不同植物所产生的次生代谢物质都会影响昆虫的行为反应(Wee *et al*., 2010; Williams *et al*., 2010),因此,要将实验成果应用于田间害虫防治,还需要后期田间试验的进一步验证。

参考文献(References)

Deng JY, 2004. Studies on Insect Pheromone Formulations and Effects of Plant Volatiles on Insect Pheromone Trapping. PhD Dissertation, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Shanghai. [邓建宇, 2004. 昆虫信息素剂型的研究和植物气味物质对昆虫信息素诱蛾效果的影响. 上海: 中国科学院研究生院博士学位论文]

Dorn S, Natale D, Mattiacci L, Hern A, Pasqualini E, Dorn S, 2003. Response of female *Cydia molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) to plant derived volatiles. *Bull. Entomol. Res*., 93(4): 335.

Du JW, 1988. Insect Pheromones and Their Applications. China Forestry Publishing House, Beijing. [杜家纬, 1988. 昆虫信息素及其应用. 北京: 中国林业出版社]

Du JW, 2001. Plant-insect chemical communication and its behavior control. *Acta Phytophysiol. Sin*., 27(3): 193 – 200. [杜家纬, 2001. 植物-昆虫间的化学通讯及其行为控制. 植物生理与分子生物学学报, 27(3): 193 – 200]

Du YJ, Yan FS, 1994. The role of plant volatiles in tritrophic interactions among phytophagous insects, their host plants and natural enemies. *Acta Entomol. Sin*., 27(2): 233 – 250. [杜永均, 严福顺, 1994. 植物挥发性次生物质在植食性昆虫、寄生植物和昆虫天敌关系中的作用机理. 昆虫学报, 27(2): 233 – 250]

Goh HG, Lee SG, Choi YM, 1991. Oviposition and feeding preference of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Crop Prot*., 33(2): 44 – 47.

Gu WX, Duan SS, Luo SM, 1998. Ecological characteristic of terpenoids and their allelopathic effects to plants. *J. South China Agric. Univ*., (4): 108 – 112. [谷文祥, 段舜山, 骆世明, 1998. 萜类化合物的生态特性及其对植物的化感作用. 华南农业大学学报, (4): 108 – 112]

Guo J, 2004. Chemical messengers and the oviposition behavior. *Trop. For*., 32(1): 16 – 19. [郭建, 2004. 信息化学物质与昆虫的产卵行为. 热带林业, 32(1): 16 – 19]

He KL, Wen LP, Wang ZY, Zhou DR, Cong B, 2000. Oviposition response of Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée), to certain corn plant volatiles. *Acta Entomol. Sin*., 43(Suppl.): 200 – 205. [何康来, 文丽萍, 王振营, 周大荣, 丛斌, 2000. 几种玉米气味化合物对亚洲玉米螟产卵选择的影响. 昆虫学报, 43(增刊): 200 – 205]

Huang CH, Yan FM, Byers JA, Wang RJ, Xu CR, 2009. Volatiles induced by the larvae of the Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis*) in maize plants affect behavior of conspecific larvae and female adults. *Insect Sci*., 16(4): 311 – 320.

Hughes PR, Renwick J, Lopez KD, 2010. New oviposition stimulants for the diamondback moth in cabbage. *Entomol. Exp. Appl*., 85(3): 281 – 283.

Jung HJ, Sung WS, Yeo SH, Kim HS, Lee IS, Woo ER, Dong GL, 2006. Antifungal effect of amentoflavone derived from *Selaginella tamariscina*. *Arch. Pharm. Res*., 29(9): 746 – 751.

Kanno H, Harris MO, 2010. Physical features of grass leaves influence the placement of eggs within the plant by the Hessian fly. *Entomol. Exp. Appl*., 96(1): 69 – 80.

Li HS, Huang JH, Zhang XY, Chen YF, Yang J, Hei L, 2005. Allelopathic effects of *Cymbopogon citratu* volatile and its chemical components. *Chin. J. Appl. Ecol*., 16(4): 763 – 767. [黎华寿, 黄京华, 张修玉, 陈玉芬, 杨军, 黑亮, 2005. 香茅天然挥发物的化感作用及其化学成分分析. 应用生态学报, 16(4): 763 –

767］

Li WD, Li TW, Chen SX, 2001. Studies on the Asian Corn Borer: Dominant Species, Biology, Life Table and New Control Techniques. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing.［李文德，李腾武，陈素馨，2001. 亚洲玉米螟研究：优势种、生物学、生命表、防治新技术. 北京：中国农业科技出版社］

Li WD, Wang XZ, 1981. Relationship between corn borer and host plants. *Plant Prot.*, 7(1): 10–11.［李文德，王秀珍，1981. 玉米螟与寄主植物的关系. 植物保护，7(1): 10–11］

Liu YX, Meng XZ, 2002. Behavioral response of male *Acleris fimbriana* Thunberg *et* Becklin (Lepidoptera: Tortricidae) to synthetic sex pheromones. *Acta Entomol. Sin.*, 45(4): 436–440.［刘玉秀，孟宪佐，2002. 黄斑卷蛾雄蛾对性信息素的行为反应. 昆虫学报，45(4): 436–440］

Molnár BP, Tóth Z, Fejestóth A, Dekker T, Kárpáti Z, 2015. Electrophysiologically-active maize volatiles attract gravid female European corn borer, *Ostrinia nubilalis*. *J. Chem. Ecol.*, 41(11): 997–1005.

Müller C, Hilker M, 2001. Host finding and oviposition behavior in a chrysomelid specialist – the importance of host plant surface waxes. *J. Chem. Ecol.*, 27(5): 985–994.

Nyasani JO, Meyhofer R, Subramanian S, Poehling H M, 2013. Feeding and oviposition preference of *Frankliniella occidentalis* for crops and weeds in Kenyan French bean fields. *J. Appl. Entomol.*, 137(3): 204–213.

Olsson PO, Anderbrant O, Löfstedt C, Borg-Karlson AK, Liblikas I, 2005. Electrophysiological and behavioral responses to chocolate volatiles in both sexes of the pyralid moths *Ephestia cautella* and *Plodia interpunctella*. *J. Chem. Ecol.*, 31(12): 2947–2961.

Thompson JN, 2011. Evolutionary ecology of the relationship between oviposition preference and performance of offspring in phytophagous insects. *Entomol. Exp. Appl.*, 47(1): 3–14.

Wang ZY, Lu X, He KL, Zhou DR, 2000. Review of history, present situation and prospect of the Asian maize borer research in China. *J. Shenyang Agric. Univ.*, 31(5): 402–412.［王振营，鲁新，何康来，周大荣，2000. 我国研究亚洲玉米螟历史、现状与展望. 沈阳农业大学学报，31(5): 402–412］

Wee SL, El-Sayed AM, Gibb AR, Mitchell V, Suckling DM, 2010. Behavioural and electrophysiological responses of *Pantomorus cervinus* (Boheman) (Coleoptera: Curculionidae) to host plant volatiles. *Aust. J. Entomol.*, 47(1): 24–31.

Williams IIIL, Blackmer JL, Rodriguezsaona C, Zhu S, 2010. Plant volatiles influence electrophysiological and behavioral responses of *Lygus hesperus*. *J. Chem. Ecol.*, 36(5): 467.

Xiang YY, Yang MF, Shi ZH, Li ZZ, 2009. The behavioral response of the male black cutworm moth to female sex pheromone. *Acta Phytophy. Sin.*, 36(3): 207–212.［向玉勇，杨茂发，施祖华，李子忠，2009. 小地老虎雄蛾对性信息素的行为反应. 植物保护学报，36(3): 207–212］

Yuan ZH, Guo JF, Wang ZY, He KL, Bai SX, 2013. Feeding preference of the Asian corn borer larvae for different host plants. *Acta Phytophy. Sin.*, 40(3): 205–210.［袁志华，郭井菲，王振营，何康来，白树雄，2013. 亚洲玉米螟幼虫对不同寄主植物的取食选择性. 植物保护学报，40(3): 205–210］

Zhang HH, Chen JH, Ji QE, Luo MJ, 2015. Overview in the study and application of the influencing factors on oviposition behavior of insects. *J. Environ. Entomol.*, 37(2): 432–440.［张贺贺，陈家骅，季清娥，骆米娟，2015. 影响昆虫产卵行为的因素及其应用研究概述. 环境昆虫学报，37(2): 432–440］

Zheng XK, Li YJ, Zhang L, Feng WS, Zhang X, 2011. Antihyperglycemic activity of *Selaginella tamariscina* (Beauv.) Spring. *J. Ethnopharmacol.*, 133(2): 531–537.

Zhou DR, 1996. The occurrence, control and research progress of corn borer in China. *China Plant Prot.*, (2): 38–40.［周大荣，1996. 我国玉米螟的发生、防治与研究进展. 中国植保导刊，(2): 38–40］

Zhou DR, Wang YY, Liu BL, Ju ZL, 1980. Studies on the mass rearing of corn borer. Ⅰ. Development of a satisfactory artificial diet for larval growth. *Acta Phytophy. Sin.*, 7(2): 113–122.［周大荣，王玉英，刘宝兰，剧正理，1980. 玉米螟人工大量繁殖研究：Ⅰ. 一种半人工饲料及其改进. 植物保护学报，7(2): 113–122］

（责任编辑：赵利辉）